

doi: 10.7690/bgzdh.2013.04.04

Monte Carlo 法在弹体强度可靠性分析中的应用

杨丽¹, 于晓卓², 梁振刚¹

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110159; 2. 辽沈工业集团有限公司一〇五分厂, 沈阳 110045)

摘要: 针对以往验证弹丸可靠性方法导致的实验结果不准确的问题, 提出一种弹体强度可靠性分析方法。对火炮发射过程中弹体在膛内的应力和强度的变化规律进行分析, 得到弹体强度失效模式的概率特征, 建立有限元数学模型, 并运用应力-强度干涉方法, 通过蒙特卡罗法模拟其失效概率, 分析影响弹体强度的各种参数, 得到输入参数对输出参数危险截面上最大应力之间的相互关系。研究表明: 该研究可缩短研究设计的周期, 为弹体强度可靠性分析提供理论依据。

关键词: 弹体强度; 蒙特卡罗法; 可靠性分析; 失效概率

中图分类号: TJ013.2 **文献标志码:** A

Application of Monte Carlo Method on Reliability Analysis of Projectile Intensity

Yang Li¹, Yu Xiaozhuo², Liang Zhengang¹(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. No. 105 Factory, Liao-Shen Industries Group Co., Ltd., Shenyang 110045, China)

Abstract: Aiming at the problem that the projectile reliability analysis method causing test result error, put forwards a reliability analysis method of projectile intensity. Analyzed change rules about stress and intensity in process of artillery shooting, obtained probability characteristics of projectile intensity failure model, established finite element mathematical model, apply to stress-intensity interference method, simulate failure probability by Monte Carlo method, analyzed parameter which influence projectile intensity, obtained mutual max stress relation between input parameter to output parameter danger section. The research result shows that the research can shorten research design cycle and provide theory base for projectile intensity reliability analysis.

Key words: projectile intensity; Monte Carlo method; reliability analysis; failure probability

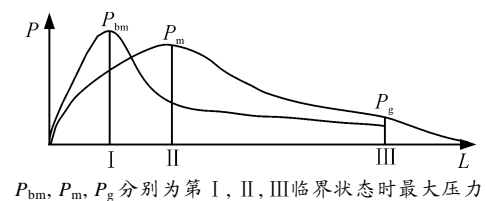
0 引言

由于弹丸不可靠造成的膛炸或早炸问题将直接危及战士的生命, 甚至影响整个战斗的胜负, 因此弹药的生产部门和使用部门历来都把可靠性问题放在头等重要的位置。弹丸在发射时发生的很多不正常现象都是由于其强度问题造成的, 而决定弹丸强度的因素很多, 如火炮膛压、弹体材料应力和弹丸零部件尺寸等, 这些量是服从一定分布规律的随机变量, 同时它们又受到发射装填误差、发射温度、火炮寿命等诸多随机因素的影响^[1]。以往靠靶场试验的方法来验证弹丸的可靠性大大地浪费了人力和财力, 并且受外界自然条件、人为因素等不定因素的影响很大, 造成实验结果不准确。基于此, 笔者运用应力-强度干涉方法, 通过蒙特卡罗法模拟其失效概率, 分析影响弹体强度的各种参数, 得到参数的随机分布规律, 为弹体强度可靠性分析提供理论依据, 以缩短研究设计的周期, 提高经济效益。

1 发射过程弹丸失效模式^[2]

发射时弹丸在上述各种载荷作用下, 材料内部产生应力和变形, 根据载荷变化的特点, 弹丸受力

变形有 3 个危险的临界状态, 如图 1 所示的 I、II、III 时刻。



P_{bm} , P_m , P_g 分别为第 I, II, III 临界状态时最大压力

图 1 发射时弹体应力状态

1) 弹丸受力和变形的第 I 临界状态。

这一临界状态相当于弹带嵌入完毕, 弹带压力达到最大值时的情况。这一时期的特点是: 火药气体压力及弹带上相应的其他载荷都很少, 整个弹体其他区域的应力和变形也很小, 唯有弹带区受较大的径向压力, 使其达到弹性或塑性径向压缩变形。

2) 弹丸受力和变形的第 II 临界状态。

这一临界状态相当于最大膛压时期。这一时期的特点是: 火药气体压力达到最大, 弹丸加速度也达到最大, 同时由于加速度而引起的惯性力等均达到最大, 这时弹体各部分的变形也为极大。线膛榴弹的变形情况是: 弹头部和圆柱部在轴向惯性力的

收稿日期: 2012-10-23; 修回日期: 2012-11-21

作者简介: 杨丽(1980—), 女, 河北人, 博士, 讲师, 从事火炮自动武器与弹药工程研究。

作用下产生径向膨胀变形, 轴向墩粗变形; 弹带区与弹尾部, 由于弹带压力与火药气体压力作用, 会发生径向压缩变形; 弹底部在弹体火药气体作用下, 可能产生向里弯凹, 这些变形中, 尤其是弹尾部与弹底区变性比较大, 有可能达到塑性变形。

3) 弹丸受力和变形的第 III 临界状态。

这一临界状态相当于弹丸出炮口时刻。这一时期的特点是: 弹丸的旋转角速度达到最大, 与角速度有关的载荷达到最大值, 但与强度有关的火药气体压力等载荷均迅速减小, 弹体上变形也相应减小。弹丸飞出炮口瞬间, 大部分载荷突然卸载, 将使弹体材料因弹性恢复而发生振动, 这种振动会引起拉伸应力与压缩应力的相互交替作用, 因此对某些抗拉强度大大低于抗压强度的脆性材料, 必须考虑由于载荷突然卸载而产生的拉伸应力对弹体的影响。

笔者主要研究弹丸受力和变形的第二临界状态, 也就是最大膛压时期的强度可靠性情况, 也是在榴弹发射过程中破坏频率最大的时刻的可靠性情况。在此时期, 弹体受到的膛内火药气体压力作用达到最大, 加速度也达到最大, 因而惯性力、装填物压力等均达到最大值, 各部的应变也发生较大的变化。因此必须对整个弹体所有部位进行强度校核, 实际上是在整个弹体上找出最危险的应力和变形, 并对最危险应力和变形进行强度校核。根据弹在膛内运动的情况, 在计算的过程中往往要忽略一些次要因素, 比如在这一阶段, 与惯性力、装填物压力相比之下, 弹带压力下降很多, 故可将弹带压力略去, 还要忽略摩擦力等产生的影响。因为在膛内压力达到最大值时弹丸的旋转角速度还很小, 在应力计算中可以略去由旋转产生的应力、导转侧力、弹丸由于旋转而产生的惯性力, 还有不平衡力(弹丸运动中由不平衡因素引起的力)。

2 弹体强度模型的有限元分析

建立某弹丸的弹体强度模型, 进行有限元分析。在进行有限元分析过程中, 首先以确定性的数据代入计算, 分析失效模式, 建立失效判据, 然后再把不确定的因素考虑进去。

表 1 某弹丸弹体材料基本参数

材料	用途	参数			泊松比
		强度/ Pa	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ Pa	
D60	弹体材料	421E+8	7 820	2.1E+11	0.3

弹体在发射时最大膛压为 320 Mpa, 其他参数如表 1 所示。由于弹体为轴对称结构, 为减小运算量, 提高计算精度, 所建立的轴对称 1/2 模型如图

2 所示。根据弹体模型的实际尺寸, 以表 1 中的参数运算可以得到如图 3 所示, 弹体在最大膛压时刻的 mises 最大应力。

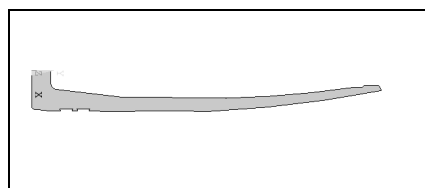


图 2 弹体 1/2 有限元模型

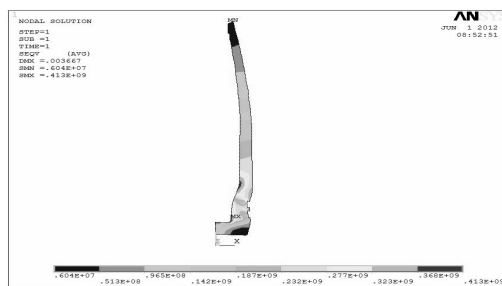


图 3 弹体在最大膛压时刻 mises 的应力云图

由图 3 可知, 弹体的应力最大的点位置位于弹底的凹槽处, 最大应力值 DMX=0.413E+9, 没有超过弹体材料的屈服极限。由于在弹体反射过程中火药气体压力过大, 不可能承受弹体在发射时候的主要应力, 如惯性力; 因此, 这些力主要由弹底部承受, 弹头部受力较小, 应力也较小, 对弹体强度的影响不大, 弹尾部的尾锥角为 6°~9°范围以内, 对主方向改变的影响也不大。如果在发射过程中, 受力最大的点处的应力超过了弹体材料的屈服极限, 则认为弹丸失效; 反之, 则是安全的。

3 Monte Carlo 模拟法产生随机变量

Monte Carlo 方法^[3-4]也可以称为蒙特卡罗模拟法, 或随机抽样(模拟)法, 或统计试验法, 它是通过对随机变量的统计试验或随机抽样, 获得数学、物理和工程问题的近似解的方法。它可以解决各种类型的问题, 但总的来说, 视其是否涉及随机过程的性态和结果, 这些问题可分为 2 类: 第 1 类是确定性的数学问题, 如计算多重积分、解线性代数方程组等; 第 2 类是随机性问题, 如原子核物理问题、运筹学中的库存、随机服务系统中的排队问题、动物的生态竞争和传染病的蔓延问题等。笔者的立足点是用蒙特卡罗法来求解概率问题^[5]。

Monte Carlo 方法用于可靠性计算基本原理为: 当试验或抽样次数 n 充分大时, 某一事件出现的概率近似等于该事件发生的概率^[6]。

弹体材料及炸药密度呈现出某种随机分布, 但材料的密度对弹体失效的影响并不大, 故不考虑此

因素的影响，只将弹性模量、泊松比、屈服极限作为随机变量，由三者的均值、标准差，得出弹性模量、泊松比、屈服极限的随机抽样，其数值如表 2 所示。

表 2 弹体材料参数抽样数据

项目	参数		
	弹性模量/Pa	泊松比	屈服极限/Pa
均值	2.1E+11	0.300	4.21E+8
标准差	6.18E+9	0.015	3.67E+6

假设上述 3 个随机变量符合正态分布，运用 Matlab 软件得出随机变量的 100 组随机数据。表 3、表 4 和表 5 分别列出为弹性模量、泊松比、屈服极限的随机抽样值的部分数据。

表 3 弹性模量的随机抽样数据

随机弹性模量/Pa				
2.151 9E+11	2.045 1E+11	2.106 2E+11	2.066 3E+11	2.118 8E+11
2.062 9E+11	2.130 3E+11	2.145 7E+11	2.205 8E+11	2.088 0E+11
...
2.164 2E+11	2.030 9E+11	2.177 9E+11	2.140 8E+11	2.095 8E+11
2.087 9E+11	2.086 6E+11	2.081 3E+11	2.101 4E+11	2.103 2E+11
2.151 1E+11	2.194 4E+11	2.128 9E+11	2.087 0E+11	2.138 6E+11

表 4 泊松比的随机抽样数据

随机泊松比				
0.302 7	0.284 6	0.314 2	0.304 6	0.302 0
0.307 7	0.303 9	0.285 9	0.297 6	0.297 8
...
0.303 6	0.289 6	0.290 2	0.317 9	0.275 8
0.299 6	0.270 8	0.315 3	0.312 9	0.300 1
0.298 9	0.262 7	0.308 7	0.267 1	0.265 2

表 5 屈服极限的随机抽样数据

随机屈服极限/Pa				
4.212 9E+8	4.175 2E+8	4.225 1E+8	4.234 8E+8	4.241 5E+8
4.184 6E+8	4.226 5E+8	4.213 7E+8	4.204 3E+8	4.229 7E+8
...
4.278 9E+8	4.244 5E+8	4.238 9E+8	4.177 9E+8	4.221 7E+8
4.189 5E+8	4.198 6E+8	4.189 1E+8	4.172 4E+8	4.176 6E+8
4.202 3E+8	4.147 7E+8	4.232 3E+8	4.205 7E+8	4.235 7E+8

4 弹体强度可靠度的求解

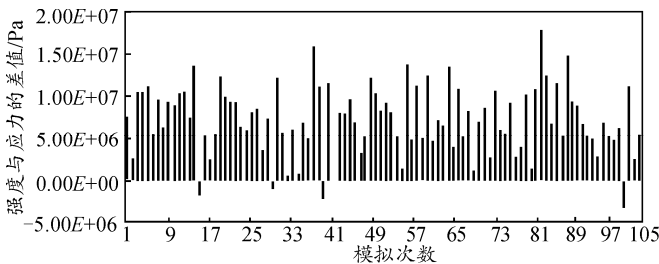


图 4 $\delta-S$ 的直方图

将弹性模量、泊松比的随机参数带入 $N(N$ 为模拟次数) 次后得出弹体强度最危险点的最大应力值 S ，每组的随机变量得出的最大应力 S 与其随机抽样的强度屈服极限 δ 进行比较，如果最大应力 S 大于屈服极限 δ ，则弹体失效；反之，则安全。模拟之后求出 $\delta-S>0$ 的总次数 $k = N_{(\delta-S)>0}$ ，通过模拟得出 $k=96$ ，如图 4 为 $\delta-S$ 的直方图， $R=(N_{(\delta-S)>0})/N$ ，

得出其可靠度 $R=96\%$ 。

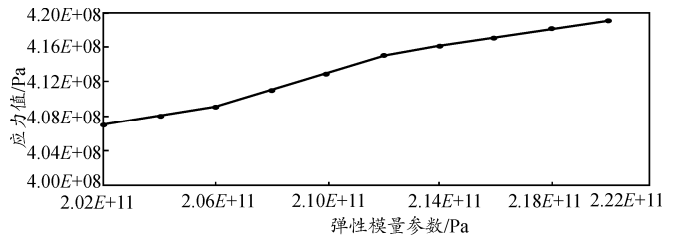


图 5 弹性模量与危险点处应力的关系

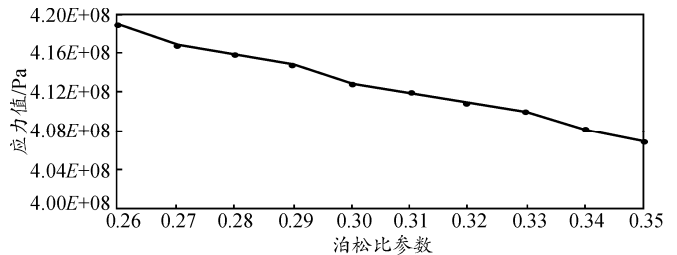


图 6 弹泊松比与危险点处应力的关系

弹体强度失效概率是由多种因素共同作用的结果，但这些因素对失效概率的影响却不尽相同。危险截面上最大应力的影响对失效概率有着直接的影响，首先要考察输入参数对输出参数危险截面上最大应力的相互关系，可得到对它们间的相互关系。

5 结论

- 1) 由图 5 计算结果可知，弹体材料的杨氏模量变小时，由于受到轴向惯性力的作用，危险截面的面积则变大，危险截面上的应力则相对变小了。
- 2) 由图 6 可知，弹体材料随着泊松比的增大而使危险截面上的应力变小。泊松比主要是表现材料体积变化，当泊松比为 0 时，材料的体积变化最大；当材料的泊松比为 0.5 时，材料的体积没有变化。
- 3) 由于材料这些参量存在波动性，使得材料的强度不可能是一个定值，而是一个变量；而传统方法却把材料的强度看成是不变的量，使材料的强度校核不够精确，从而也证明了可靠性设计的优越性。

参考文献:

[1] 石丽, 李坚. 基于神经网络的弹丸强度可靠性分析[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(1): 62-63.

[2] 魏惠之. 弹丸设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[3] Wittwer J W. Monte Carlo simulation basics[OL]. From Vertex42. com, June 1, 2004, <http://www.Vertex42.com/ExcelArticles/mc/MontCarlo simulation. html>.

[4] Isabel Beichl, Francis Sullivan. Monte Carlo methods [J]. Computing in Science & Engineering, 2006, 8(2): 7-8.

[5] 杨立功, 郭齐胜, 史立晨. 蒙特卡罗法及其在射弹散布仿真中的应用[J]. 计算机仿真, 2001, 18(1): 84-86.

[6] 肖刚, 李天柁. 系统可靠性分析中的蒙特卡罗方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.